



Original Article

Chlorophyll-*a* 연속 관측 변화 패턴에 따른 식물플랑크톤 군집 변화 분석

한혜정¹ · 강준수^{1,2} · 김현정¹ · 강돈혁³ · 정승원^{1,*}

¹한국해양과학기술원 해양시료도서관

²국립부경대학교 해양학과

³한국해양과학기술원 해양방위연구센터

Analysis of Phytoplankton Community Change According to Continuous Observation Pattern of Chlorophyll-*a* Concentration

Hye Jung Han¹, JunSu Kang^{1,2}, Hyun-Jung Kim¹, Donhyug Kang³, and Seung Won Jung^{1,*}

¹Library of Marine Samples, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje, 53201, Korea

²Department of Oceanography, College of Environmental and Marine Science and Technology, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

³Maritime Security Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan, 49111, Korea

요 약

통영 연안 해역에서 chlorophyll-*a* 농도 변화 패턴과 그에 따른 식물플랑크톤 군집 변동을 파악하기 위해 62일간 연속 관측(2017년 7월 29일~9월 28일) 및 주 1~2회의 주기적인 식물플랑크톤 군집 분석을 실시하였다. 조사기간 동안 chlorophyll-*a* 농도가 증감하는 변화가 3회 발생하였다. 첫 번째 chlorophyll-*a* 농도 변화(8월 6일~14일)에서는 14~16 시 급격한 증가가 반복적으로 나타났으며, 이는 식물플랑크톤 군집 중 최우점종으로 출현한 외편모조류 *Alexandrium affine*의 일주수직운동에 의한 결과이다. 두 번째(8월 24일~30일) 및 세 번째(9월 12일~17일) 변화는 *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex 등의 규조류에 의해 증가하였으며, 이때 규조류는 event 1의 *A. affine*의 14~16시에 급격한 증가와 달리 특정 시간에 관계없이 증가하였다. 또한 실시간 chlorophyll-*a* 농도의 연속 관측을 통해 *A. affine*의 일주수직운동 및 특징적인 chlorophyll-*a* 농도 변화 양상을 찾아냈으며, 3회의 chlorophyll-*a* 농도에 대한 변화는 7~12일의 간격을 두고 증가하였다.

Abstract – To understand the changes in chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton community in Tongyeong coastal waters, Korea, we continuously monitored chlorophyll-*a* concentrations using a fluorescence sensor from July 29 to September 28, 2017(62 days). Furthermore, phytoplankton analyses were conducted periodically to monitor changes in dominant species affected by variations in chlorophyll-*a* concentrations. In the presented study, chlorophyll-*a* concentrations increased rapidly three times(event 1~3). During the first event(August 6 to 14), rapid and repeated increases in chlorophyll-*a* concentration during every 14:00 to 16:00 pm were the result of the diel vertical migration of *Alexandrium affine*(the dominant species during the event). The second and third events occurred from August 24 to 30 and September 12 to 17, respectively. During these events, increases in chlorophyll-*a* concentrations were caused by diatoms(common species: *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex etc.). Unlike event 1, we did not observe any characteristic changes such as vertical migration of *A. affine* during these events. Therefore, the continuous monitoring of chlorophyll-*a* concentrations using a real-time detection device, such as a fluorescence sensor, is necessary and important because of the variations that occur in chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton community in the short-term.

Keywords: Tongyeong coastal waters(통영 연안), Continuous Monitoring(연속 관측), Chlorophyll-*a* concentration(엽록소-*a* 농도), Phytoplankton communities(식물플랑크톤 군집)

*Corresponding author: diatoms@kiost.ac.kr

1. 서 론

식물플랑크톤은 해양생태계에서 먹이망(food web)을 통해 상위 영양단계 생물에게 에너지를 공급하는 중요한 위치를 차지하며, 해양생태계 내에서 환경 요인의 변화에 매우 민감한 반응을 나타내기 때문에 이들의 군집구조를 파악하는 것은 해양 생태계의 특성을 평가하는 중요한 자료로 활용되고 있다(Raymont[1980]). 일부 식물플랑크톤은 독소를 생산하여 어류 및 패류에 축적되며 인간에게 까지 영향을 미치며(Shumway[1990]), 이들은 적정 환경조건에서 대량 발생하면 적조를 유발하여 양식업의 피해를 야기한다. 이렇게 적조를 유발하거나 또는 생태계에서 순기능을 하는 기초생산자로서의 식물플랑크톤은 환경 변화에 빠르게 반응하며, 그로 인한 변화는 짧은 수일에서 길게는 수개월 동안 지속된다(Chang *et al.*[1996]). 따라서, 급변하는 환경 변화에 대한 식물플랑크톤의 군집의 단, 장기적 변동을 정확히 파악하기 위해서는 연속적인 모니터링이 필요하다.

식물플랑크톤의 정량/정성적 분석은 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 일반적인 방법으로는 현미경을 통한 분석이 이루어지고 있으며, 최근에는 분자학적, 음향학적 기술 및 인공위성의 해상 자료 등의 새로운 기술을 접목하여 식물플랑크톤 생물량 및 종조성의 변동을 파악하고 있다 (Alvain *et al.*[2005]; Kim *et al.*[2017]; Taberlet *et al.*[2012]). 이중, chlorophyll-*a*는 모든 식물플랑크톤이 가지고 있는 기본적인 색소이기 때문에 chlorophyll-*a* 농도 측정은 식물플랑크톤의 생물량을 나타내는 대표적인 방법 중 하나이다. 이러한 chlorophyll-*a* 농도 측정에는 용매로 chlorophyll을 추출하여 특정 파장대에서

흡광도를 측정하여 chlorophyll-*a* 농도를 구하는 흡광광도법과 형광파장에서 형광값을 측정하여 chlorophyll-*a* 농도를 구하는 형광 측정법이 이용된다. 흡광광도법은 chlorophyll-*a* 농도를 정밀하게 측정할 수 있는 장점이 있으나, 현장에서 식물플랑크톤의 연속적인 관측시, 분석시간이 소요되므로 비효율적인 반면 형광측정법은 흡광을 측정하는 것에 비해 빠르고 민감하며, 살아있는 세포를 대상으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다(Park *et al.*[2015]). 현장에서 형광법을 이용한 chlorophyll-*a* 연속 관측 결과는 흡광광도법에 의한 chlorophyll-*a* 농도와 매우 유의한 상관 관계를 보인다고 보고하였다(Gregor and Marsalek[2004]; Hwang *et al.*[2006]). 그러므로 형광측정법에 의한 연속 관측은 담수와 해양에서 다양하게 연구에 이용되고 있다(Barbini *et al.*[2004]; Chekalyuk and Hafez[2011]; Gregor and Marsalek[2004]; Izydorczyk *et al.*[2009]; Park *et al.*[2015]). 따라서, 본 연구는 통영 연안해역에서 chlorophyll-*a* 농도의 연속 관측을 통해 chlorophyll-*a* 변화 패턴의 차이와 그에 따른 식물플랑크톤 군집 변동을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

우리나라 남해 연안역은 서해 연안역과 달리 인위적인 오염에 의한 영향이 상대적으로 적어 오래 전부터 해양수산자원의 산란 및 보육장으로서 널리 이용되는 청정해역으로 평가되어 왔으나, 최근에는 지속적인 오염물질의 축적과 적조의 발생 그리고 수온 상승 등으로 인하여 환경 및 생태계가 변화하여 유해성 적조 등이 빈번히 발생하고 있다(Cho and Choi[2005]; Jeong *et al.*[2000]; Yang

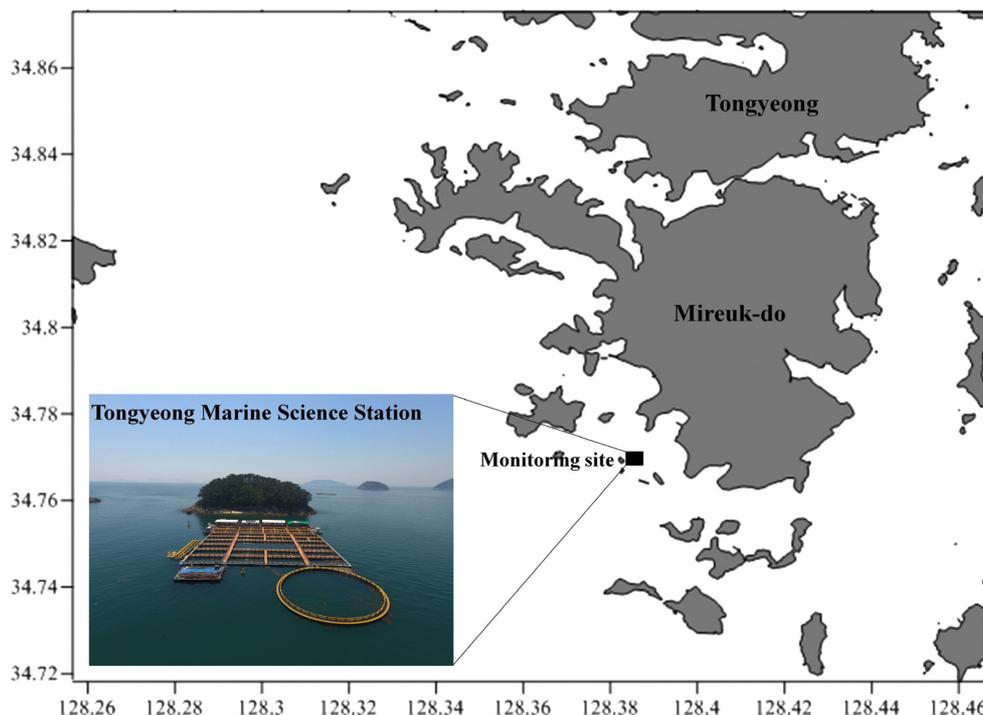


Fig. 1. Map showing a monitoring site in Tongyeong coastal waters from July 29 to September 28, 2017. A photograph is view of monitoring site of Tongyeong marine science station in Korea Institute of Ocean Science & Technology.

et al.[2000]). 특히 통영 연안해역은 남해안에서 빈번히 적조가 발생하는 해역이다(Park *et al.*[2016]). 본 연구는 통영 연안해역에서 chlorophyll-*a* 농도의 연속적인 변화를 파악하기 위하여 2017년 7월 29일부터 9월 28일까지 62일간 연속 관측을 실시하였다. 조사 정점은 통영해상과학기지에서 수행하였으며(Fig. 1), 연속 관측을 위해 chlorophyll-*a* 형광 센서가 부착된 multi-parameter(YSI EXO2, Yellow Springs, OH, USA)를 수심 1.5 m 위치에 설치하여 매 5분 간격으로 chlorophyll-*a* 농도 및 수온, 염분, pH, 용존산소(Dissolved oxygen)를 측정하였다. Chlorophyll-*a* 농도는 YSI EXO2 model로 측정된 값의 신뢰성을 검증하기 위하여 동일 수심에서 73회에 걸쳐 1 L를 채수하여 Humphrey and Jeffrey[1997]의 chlorophyll-*a* 흡광광도법에 의해 비교 분석하였다. 또한 수온, 염분, pH, 용존산소는 YSI 6920 multi-parameter(Yellow Springs, OH, USA)를 이용해 동일 수심에서 측정하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. Mooring 한 multi-parameter(YSI EXO2, 6920)는 연속 관측 기간 중 총 12회 biofouling 생물 제거와 센서보정을 실시하였다.

Chlorophyll-*a* 농도 변화에 영향을 미치는 식물플랑크톤을 파악하기 위하여 62일 연속 관측 중 총 12회(주 1~2회) 동일 정점에서 식물플랑크톤 군집을 분석하였다. 식물플랑크톤 군집의 시간 및 수심에 따른 변화를 파악하기 위하여 매 조사마다 9시, 12시, 16시 및 표층, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m에서 1 L를 채수 하였으며, 고정 시 무각 외편모조류 세포의 파괴를 고려하여 식물플랑크톤을 고정하지 않고 채집 현장(통영해상과학기지)에서 즉시 500 μ L를 취하여 광학현미경(Primo Star, Zeiss, Oberkochen, Germany)하에서 총 식물플랑크톤 개수 및 종 동정을 실시하였다. 이때 식물플랑크톤 개체수는 500 cells 개수를 기준으로 하였으며, 500 cells 이하 시 일정량의 샘플을 더 취하여 500 cells 이상까지 검경하였다. 또한 광학현미경에서 분류가 힘든 식물플랑크톤은 주사전자현미경(JSM-7600F, Jeol, Japan)으로 동정하였다(Jung *et al.*[2010]).

영양염류 분석을 위한 시료는 식물플랑크톤 군집분석과 동일한 시간에 표층에서 총 12회 채집하였다. 용존무기질소[Dissolved inorganic nitrogen, DIN(암모니아성 질소+아질산성 질소+질산성 질소)], 용존무기인(Dissolved inorganic phosphorus, DIP), 용존규소(Dissolved silica, DSi)의 분석은 현장에서 해수를 GF/F filter로 여과한 여과액을 산 세척된 15 mL conical tube에 5개씩 분주하여 담은 후 드라이아이스로 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다. 이때, 암모니아 질소 분석을 위한 시료는 즉시 1 N 황산(H_2SO_4)을 넣어 암모니아 질소를 고정하였다. 실험실로 옮겨진 시료는 영양염 분석기(Lachat Qickchem; Lachat Instrument, Milwaukee, USA)로 분석을 실시하였다. 모든 시료는 2~3회 반복 분석을 실시하였고, 표준해수시료(Wako CSK standard, 회수율: 92~105%) 분석을 통해 결과의 신뢰성을 확보하였다. 표층 일사량은 통영해상과학기지에서 측정하였으며, 해수면 1 m 위에 CMP 11 pyranometer (Thies clima)를 설치하여 chlorophyll-*a* 측정과 동일하게 5분 간격으로 측정하였다.

통영 해역의 8월 적조생물에 대한 공간적인 분석을 위해 8월 11일과 8월 14일 두 차례에 걸쳐 통영/남해 해역에서 34 km \times 24 km

면적으로 총 34개 격자망 정점을 선정하여 조사하였다. 조사는 표층(1.5 m)에서 1 L를 채수하여 lugol 용액으로 고정된 후 광학현미경(Primo Star, Zeiss, Oberkochen, Germany)을 이용하여 적조생물 군집을 분석하였다. 연속 관측 기간 동안 측정된 식물플랑크톤, chlorophyll-*a* 농도 및 환경 요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 Pearson 상관분석을 SPSS(ver. 10.0) 프로그램으로 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 연속 관측을 통한 환경 요인의 변화

조사기간 중 수온은 20.1~28.7°C(평균 25.2 \pm 1.7°C)로 8월 1일부터 9월 5일까지 35일동안 25°C 이상의 고수온기를 보인 후 점차적으로 감소하였다(Fig. 2A). 염분은 31.2~34.0(32.4 \pm 0.5)를 보였으며 60 mm/d 이상의 집중 강우(8월 14일, 9월 6일, 11일)시 염분은 감소하였다(Fig. 2A). pH와 용존산소는 각각 7.97~8.40 (8.18 \pm 0.10), 5.41~11.68 mg/L(7.20 \pm 0.84 mg/L)의 범위를 보였으며(Fig. 2B), chlorophyll-*a* 농도 변화와 용존산소는 유의적 상관관계를 보였다(DO vs. chl-*a*: $r=0.382$, $p<0.01$). 이는 Jung *et al.*[2011]에 의하면 마산만에서 용존산소와 chlorophyll-*a* 농도간에 높은 상관관계를 보여 본 연구결과와 일치하였다. DIN은 3.00~26.33 μ M (6.83 \pm 4.61 μ M), DIP는 0.048~0.756 μ M (0.205 \pm 0.146 μ M), DSi는 1.47~17.58 μ M (7.64 \pm 3.25 μ M)의 범위를 보였다(Fig. 2C). 영양염류는 전반적으로 8월 14일부터 증가하다가 8월 25일 이후 감소하였으나 8월 30일에 다시 증가하는 경향을 보였다. DIN과 DIP는 chlorophyll-*a* 농도 및 식물플랑크톤 개체수와 상관관계를 보이지 않았으며, DSi는 식물플랑크톤 개체수와 양의 상관관계를 보였으나($r=0.37$, $p<0.05$) chlorophyll-*a* 농도와는 상관관계를 보이지 않았다. 표층 일사량은 2.1~1053.5 W/m² (305.3 \pm 234.3 W/m²)이며, 일 평균 일사량은 8월 6일에 459.0 W/m²로 가장 높았고, 8월 14일에 30.5 W/m²로 가장 낮았다. 표층 일사량의 일변화는 주로 오전 6시에 증가하여 정오 전후에 가장 높은 광도를 보인 후 오후 6시까지 점차적으로 감소하였다. 또한 집중 강우시에는 일사량의 감소를 보였다.

3.2 연속 관측을 통한 chlorophyll-*a* 농도의 변화

Multi-parameter (YSI EXO2)의 형광센서(fluorescence sensor)를 이용해 측정된 chlorophyll-*a* 농도와 채수하여 chlorophyll-*a*를 추출한 후 흡광광도법으로 측정된 농도를 비교하였다. 형광센서로 측정된 chlorophyll-*a* 값은 평균 2.3 \pm 1.8 μ g/L이고 흡광광도법으로 분석된 chlorophyll-*a* 값은 평균 2.4 \pm 1.6 μ g/L로 두 측정값이 유사하였으며, 상관계수는 0.850($p<0.001$)로 높은 양의 상관관계를 가졌다. 따라서 본 연구에서 형광 센서로 측정된 chlorophyll-*a* 농도의 결과는 연속 관측 변화를 해석하기에 충분한 신뢰성을 확보했다고 판단된다(Fig. 3).

62일동안 연속 관측한 chlorophyll-*a* 농도 변화는 0.2~31.8 μ g/L (3.1 \pm 3.2 μ g/L)의 범위를 보였다. 특히 chlorophyll-*a* 농도가 급격히 증감하는 변화가 3회 나타났으며(event 1~3), 이러한 변화는 7~12일의 간격을 두고 발생하였다(Fig. 4A). 첫 번째 변화(event 1)는

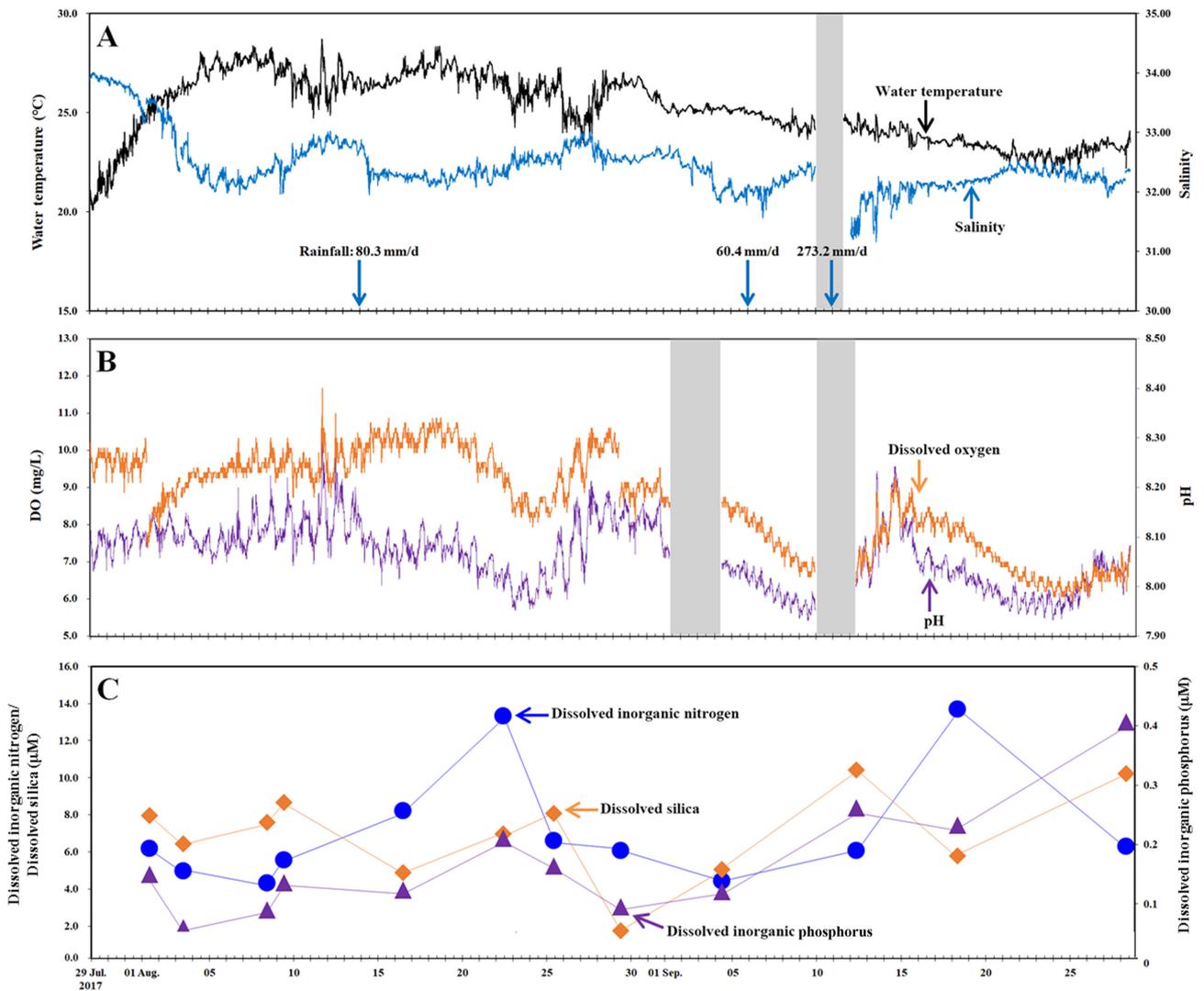


Fig. 2. Results of continuous monitoring of water temperature and salinity (A) and dissolved oxygen and pH (B), and snapshot monitoring of nutrients (C) (n=12, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorus, and dissolved silica) from July 29 to September 28, 2017. Shadow gray box in figures A and B indicate periods of inspection of the multi-parameter.

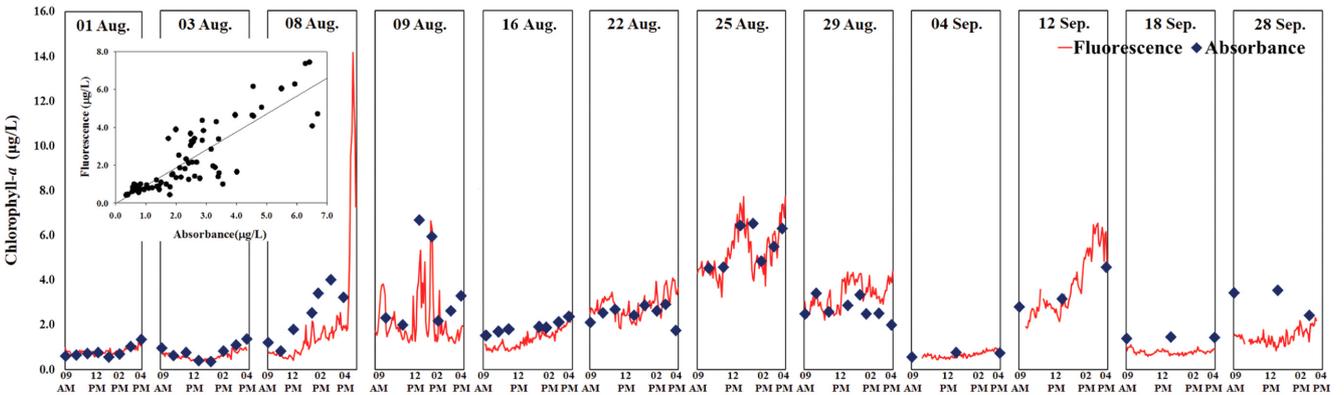


Fig. 3. Comparison of two different analyzed methods (fluorescence and absorbance) of chlorophyll-a concentration (n=73). Inner figure shows correlation of chlorophyll-a concentrations between fluorescence and absorbance results ($r=0.850$, $p<0.001$).

8월 6일~14일에 발생하였으며, 오후 14~16시에 chlorophyll-a 농도의 급격한 증가가 반복적으로 관찰되었다. 그러나 두 번째(event

2: 8월 24~30일), 세 번째(event 3: 9월 12~17일) 변화는 event 1과 달리 특정 시간에 관계없이 계속적으로 증가를 하다가 감소하는 경

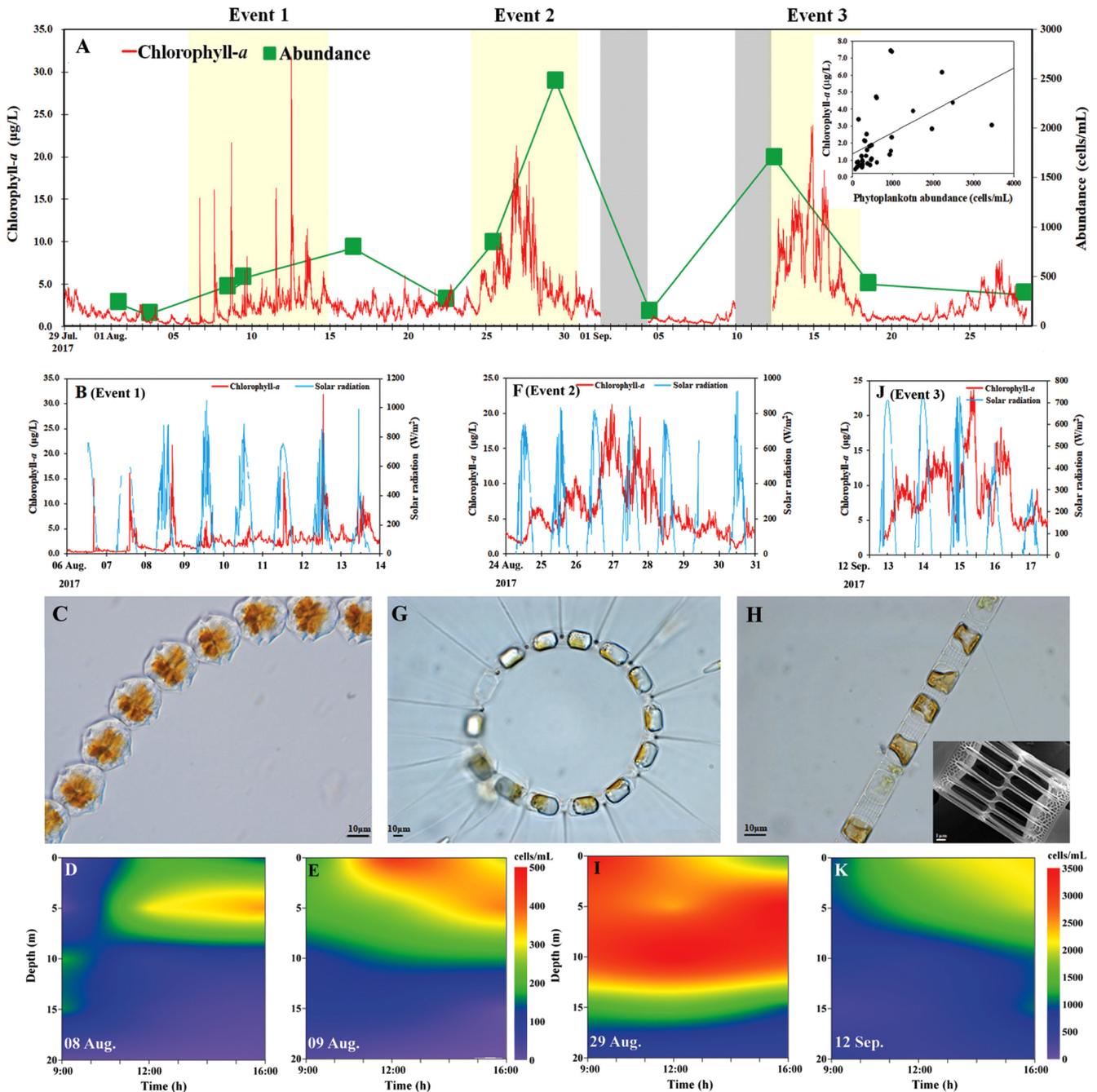


Fig. 4. Results of continuous monitoring of chlorophyll-*a* concentrations. A, comparison between chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton abundances (inner figure shows correlation between chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton abundance, $r=0.638$, $p<0.001$); B, F, and J, changes in chlorophyll-*a* concentration and solar radiation during events (event 1, August 6 to 14; event 2, August 24 to 30; event 3, September 12 to 17); C, a photograph of *Alexandrium affine* (red-tide organisms in event 1 periods); G and H: photographs of *Chaetoceros curvisetus* and *Skeletonema marinoi-dorhnii* complex (pre-dominant diatom in event 2~3 periods); D and E, spatial and temporal distributions of *Alexandrium affine* (red-tide causing organism); I and K, spatial and temporal distributions of diatoms (common group in phytoplankton communities). Shadow gray box in figure A indicates periods of inspection of the multi-parameter.

향을 보였다(Fig. 4A). 이러한 chlorophyll-*a* 농도 변화가 어떠한 식물플랑크톤 군집에 의한 영향인지 파악하기 위해 12회(주 1~2회) 조사기간 중 시간/수심별(총 156회)로 분석한 결과, 총 식물플랑크톤은 122종이 출현하였으며, 이 중 규조류 92종(37속), 외편모조류

26종(16속), 침편모조류 1종(1속), 규질편모조류 2종(1속), 미동정된 편모조류 1종이 관찰되었다. 식물플랑크톤 개체수는 $72\sim 3,454$ cells/mL(697 ± 753 cells/mL)로, 주요 출현종(전체 식물플랑크톤 출현종 중 총 5% 이상)은 *Chaetoceros curvisetus*, *Alexandrium*

affine, *Pseudo-nitzschia* spp. (*P. delicatissima*, *P. pungens* 포함), *Chaetoceros lacinosus* 이었으며, 이들 종은 전체 식물플랑크톤 군집의 54%를 차지하였다. 총 식물플랑크톤 개체수와 chlorophyll-*a* 농도와와의 변화는 유의한 상관관계($r=0.638$, $p<0.001$)를 보였다(Fig. 4A). 이는 통영 해역에서는 *Skeletonema marinoi*, *C. curvisetus* 등의 규조류가 우점을 하며 식물플랑크톤 개체수와 chlorophyll-*a* 농도 간에 높은 상관성을 보인다는 결과와 일치한다(Joo *et al.*[2011]).

Event 1 기간 동안 chlorophyll-*a* 농도는 $0.3\sim 31.8$ $\mu\text{g/L}$ (2.8 ± 2.5 $\mu\text{g/L}$)이었으며(Fig. 4B), 수온은 $24.7\sim 28.7$ $^{\circ}\text{C}$ (26.9 ± 0.7 $^{\circ}\text{C}$) 범위로 고수온기에 해당되며, 염분은 $32.0\sim 33.0$ (32.5 ± 0.3) 범위를 보였다. Event 1 기간 동안 매 14~16시에 chlorophyll-*a* 농도의 급격한 증가 후 감소되는 변화가 반복적으로 나타났는데(Fig. 4B), 이는 외편모조류 *Alexandrium affine*의(Fig. 4C) 일주수직운동(diel vertical migration)에 따른 결과이다(Fig. 4D, E). 특히 8월 8일 수심(표층, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m) 및 시간(09시, 12시, 16시)별 *A. affine*의 개체수 변동을 보면 오전 9시에 10~15 m 수심에 존재하다가(198 ± 4 cells/mL) 광량의 증가에 따라 표층으로 이동하여 16시경에 가장 높은 개체수($1,285$ cells/mL)를 보인 일주수직운동을 보였다(Fig. 4D). 외편모조류의 일주수직운동은 *Alexandrium tamarense*, *Akashiwo sanguinea*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Gonyaulax catenata* 등 다양한 종들에 의해서 발생하고 있다. 이러한 외편모조류의 일주수직 운동에 영향을 미치는 요인은 다양하나 일반적으로 주광성(phototaxis)에 의한 반응으로 여겨진다(Jephson[2012]). 본 연구에서 *A. affine*는 일주수직운동에 의해 14~16시에 표층에서 가장 높은 개체수를 보였으며, *C. polykrikoides*도 14~16시에 표층에서 가장 높은 밀도를 보였다(Kim *et al.*[2010]; Kim *et al.*[2017]; Park *et al.*[2001]). 그러나 2016년 장목만에서 적조를 발생시킨 *A. sanguinea*는 12시에 표층에서 가장 높은 밀도를 보여(미발표 자료), 일주수직운동을 하는 종이라도 각기 다른 시간대에 표층에 밀집하는 양상을 보였다. 빛의 세기와 외편모조류의 일주수직운동 연구에서 *Gonyaulax tarmarensis* (*Alexandrium tamarense*)와 *Heterocapsa*

*triquetra*는 일사량이 각각 300 및 700 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 일 때 표층에서 가장 높은 개체수를 보였으며(Anderson and Stolzenbach[1985]), 따라서 종마다 선호하는 빛의 세기가 다르므로 일사량에 따라 각 외편모조류가 일주수직운동에 의해 표층에 밀집하는 시각이 다르고 판단된다.

*Alexandrium affine*는 온대해역부터 열대해역까지 출현하는 종으로(Band-Schmidt *et al.* [2003]; Wagey *et al.* [2001]), *Alexandrium tamarense*, *Alexandrium catenella*, *Alexandrium ostenfeldii*의 최적성장 온도인 $11\sim 25$ $^{\circ}\text{C}$ 와 달리(Jensen and Moestrup [1997]; Nagai *et al.* [2004]; Navarro *et al.*[2006]), $27.5\sim 29$ $^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높은 성장 속도를 보인 종으로 알려져 있다(Band-Schmidt *et al.*[2003]). 따라서 *A. affine*는 고수온기와 함께 서식하기에 적절한 환경이 된다면 대규모 적조를 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다. Event 1 기간 중의 DIN은 $3.00\sim 6.93$ μM (4.94 ± 1.36 μM), DIP는 $0.048\sim 0.202$ μM (0.112 ± 0.061 μM), DSi는 $5.12\sim 10.62$ μM (8.11 ± 2.13 μM)을 보였다. DIP와 DSi는 *A. affine*가 대발생시 감소된 반면, DIN은 오히려 증가하였다. 본 연구에서 *A. affine* 증가시 DIN가 증가한 것에 대해서 명확히 규명하지 못하였으나, Wagey *et al.*[2001]의 연구 결과와 마찬가지로 *A. affine* 적조 발생시와 질소원의 관계에 대해 연구가 필요하다. 8월 14일은 집중 강우에 의한 염분의 감소와 낮은 일사량을 보였으며, chlorophyll-*a* 농도가 감소하였다. 특히 *A. affine*의 개체수 감소를 관찰하였으며, 또한 통영/남해 연안에서도 *A. affine*의 개체수의 변화를 관찰할 수 있었다. 8월 11일에 통영/남해 연안에서 *A. affine* 적조가 관찰되었으며(Fig. 5A) 최대 5,460 cells/mL의 개체수를 보였으나 집중강우가 내렸던 8월 14일에는 최대 135 cells/mL의 개체수를 보였다(Fig. 5B). 일반적으로 여름철 강우는 영양염을 공급하여 적조를 유발시킨다고 알려져 있다(Lee[2006]; Yang *et al.*[2000]). 그러나 집중 강우 및 태풍에 의해 식물플랑크톤 군집의 급격한 변화가 발생할 수 있으며(Chang *et al.*[1996]; Jang *et al.* [2010]), 특히 태풍으로 인한 물리적 제한에 따라 태풍 이전에 존재 하던 식물플랑크톤 대발생이 감소한다는 보고가 있다(Wetz and

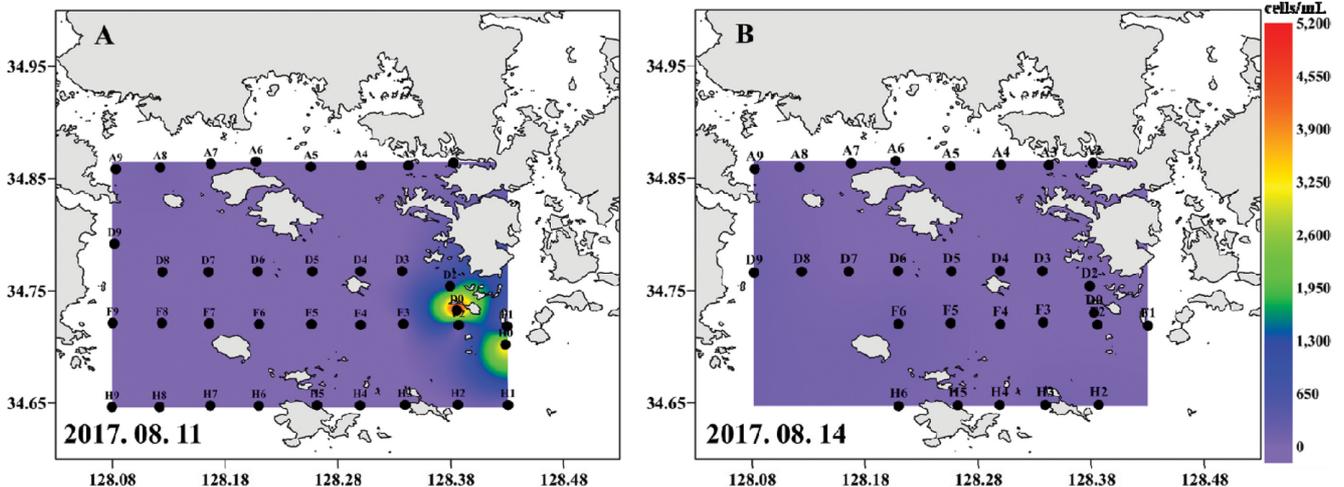


Fig. 5. Spatial and temporal distribution of a red-tide species, *Alexandrium affine* on 11 August (A) and 14 August, 2017 (B).

Paerl[2008]). 따라서 8월 14일 집중 강우에 의한 물리적 영향으로 *A. affine* 적조가 소멸 되었다고 판단된다.

Event 2 기간에서 chlorophyll-*a* 농도는 0.7~21.3 $\mu\text{g/L}$ ($5.7 \pm 3.9 \mu\text{g/L}$)를 보였다(Fig. 4F). 이때의 수온과 염분은 각각 23.5~27.3 $^{\circ}\text{C}$ ($25.9 \pm 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 32.4~33.0 (32.6 ± 0.1)로 수온은 event 1 기간보다 평균 1.1 $^{\circ}\text{C}$ 낮아졌으며, 염분은 거의 차이가 없었다. Event 2 기간 동안 주요 식물플랑크톤은 *Chaetoceros curvisetus* (22%), *Skeletonema marinoi-dorhnii* complex (10%), *Rhizosolenia setigera* (9%), *Pseudo-nitzschia* spp. (8%), *Chaetoceros laciniosus* (6%)로 규조류가 주요 우점종으로 출현하였다(Fig. 4G, H). 그 중 *Rhizosolenia setigera*는 8월 25일에 16%의 높은 출현밀도를 보였으나, 8월 29에는 거의 출현하지 않았다. Zingone and Wyatt[2005]은 영양염 농도가 증가함에 따라 외편모조류에서 규조류로 천이하는 과정에서 *Rhizosolenia*와 같은 규조류가 급증할 수 있음을 보고하였으며, *Rhizosolenia alata*와 *Rhizosolenia imbricata*의 대발생 동안에는 대발생 전과 후에 비해 높은 영양염 농도를 보였다(Raji et al.[2014]). 따라서 *R. setigera*의 우점 및 종의 천이는 고영양염의 공급에 따라 다른 식물플랑크톤과의 중간 경쟁력에 대해 우세한 결과라 판단된다. 이 기간 중의 주요종인 *C. curvisetus*, *S. marinoi-dorhnii* complex 등의 규조류는 우리나라 연안해역에서 빈번히 출현하는 종이다(Jung et al.[2007]; Jung et al.[2008]). 이처럼 event 2 기간에는 규조류가 chlorophyll-*a* 농도에 중요하게 영향을 미치고 있었으며, 이 때의 시간에 따른 수심별 개체수의 변화는 event 1 기간에서 외편모조류가 일주수직운동을 보인 것과는 달리 개체수 분포의 특정 시간 및 수심별 변동이 관찰되지 않았다(Fig. 4I). Event 2 기간 중 DIN은 $6.58 \pm 0.32 \mu\text{M}$ 에서 $6.05 \pm 1.03 \mu\text{M}$, DIP는 $0.164 \pm 0.016 \mu\text{M}$ 에서 $0.095 \pm 0.033 \mu\text{M}$, DSI는 $8.07 \pm 0.81 \mu\text{M}$ 에서 $1.76 \pm 0.25 \mu\text{M}$ 로 감소하였다. 이는 식물플랑크톤의 대량 증식에 의해 영양염류가 소모되었다고 판단된다. 특히 event 1에 비해 DSI의 급격한 감소를 보였는데, 이는 규조류의 우점에 따른 결과이다.

Event 3 기간에서 chlorophyll-*a* 농도는 1.9~23.8 $\mu\text{g/L}$ ($9.2 \pm 4.2 \mu\text{g/L}$)를 보였다(Fig. 4J). 수온과 염분은 각각 23.1~25.0 $^{\circ}\text{C}$ ($24.0 \pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 31.2~32.3 (31.9 ± 0.2)으로 일 평균 수온이 25 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 감소하였으며, 염분의 변화는 다른 기간과 큰 차이가 없었다. 이때의 식물플랑크톤은 규조류인 *Chaetoceros curvisetus*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Skeletonema marinoi-dorhnii* complex가 우점종으로 출현하였으며, 특히 *C. curvisetus*는 57%로 최우점종을 차지하였다. 시간 및 수심별 규조류 개체수의 분포 양상은 수심 혹은 시간에 대한 특별한 변화양상을 보이지 않았다(Fig. 4K). DIN, DIP, DSI는 각각 평균 $6.06 \pm 0.75 \mu\text{M}$, $0.26 \pm 0.06 \mu\text{M}$, $10.39 \pm 2.10 \mu\text{M}$ 를 보였다. DIP와 DSI는 감소하였던 반면, event 3 종료 이후 DIN은 증가하였으며, DIN을 증가 시키는 원인에 대한 연구가 필요할 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 chlorophyll-*a* 농도 변화 패턴 및 어떠한 식물플

랑크톤이 변화에 영향을 미치는가에 대해 규명하기 위하여 통영 해역에서 chlorophyll-*a* 농도의 연속 관측(2017년 7월 29일~9월 28일) 및 주기적인 식물플랑크톤 군집 분석을 실시 한 결과, 총 3회의 chlorophyll-*a* 농도가 증감하는 변화를 확인하였다. 첫 번째 변화(8월 6일~14일)에서는 표층에서 14~16시에 chlorophyll-*a* 농도가 반복적으로 빠르게 증감하였으며, 이는 외편모조 *Alexandrium affine*의 일주수직운동의 의한 결과이다. 두 번째(8월 24일~30일) 및 세 번째(9월 12일~17일) chlorophyll-*a* 변화는 시간에 관계없이 계속적으로 증가하다가 감소하였다. 이는 규조류에 의한 변화이며, 주요 우점종은 *Chaetoceros curvisetus*, *Skeletonema marinoi-dorhnii* complex가 차지하였다. 따라서, 본 연구에서 식물플랑크톤 군집의 변화는 약 일주일 간격으로 빠르게 변화하고 있었으며, 외편모조류 및 규조류의 chlorophyll-*a* 농도의 변화는 다른 변화양상을 보이고 있었다. 특히 외편모조류 적조종의 수직 이동에 따른 표층의 급격한 chlorophyll-*a* 증감은 향후 적조 모니터링 기술로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구에서 채집된 식물플랑크톤 고정 시료는 한국해양과학기술원 해양시료도서관에 보관하였다. 본 연구에 도움을 주신 한국해양과학기술원 통영해양과학기지 박용주 기지대장님, 이용욱님, 장석일님, 정일형님께 감사 드린다. 본 연구는 해양수산부의 재원으로 한국해양수산과학기술진흥원의 지원(“적조피해 최소화를 위한 적조탐지-예측시스템 구축 및 실증화: PM60650”) 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(“해양 유해조류 자동판별 시스템 개발 및 방제적용기술 타당성 분석: NRF-2013M3A2A1067529”), 한국해양과학기술원의 기본사업(“해양 수층공간 활용 냉수성 복합생물자원개발: PE99628”)을 지원받아 수행하였다.

References

- [1] Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y. and Bréon, F.M., 2005, Remote sensing of phytoplankton groups in case I waters from global SeaWiFS imagery, Deep Sea Res. Part I ceanogr. Res. Pap. 52(11), 1989-2004.
- [2] Anderson, D.M. and Stolzenbach, K.D., 1985, Selective retention of two dinoflagellates in a well-mixed estuarine embayment: the importance of diel vertical migration and surface avoidance, Mar. Ecol. Prog. Ser., 25(1), 39-50.
- [3] Band-Schmidt, C.J., Lechuga-Devéze, C.H., Kulis, D.M. and Anderson, D.M., 2003, Culture studies of *Alexandrium affine* (Dinophyceae), a non-toxic cyst forming dinoflagellate from Bahía Concepción, Gulf of California, Botánica Marina, 46(1), 44-54.
- [4] Barbini, R., Colao, F., De Dominicis, L., Fantoni, R., Fiorani, L., Palucci, A. and Artamonov, E.S., 2004, Analysis of simultaneous chlorophyll measurements by lidar fluorosensor, MODIS and

- SeaWiFS, *Int. J. Remote Sens.*, 25(11), 2095-2110.
- [5] Chang, J., Chung, C.C. and Gong, G.C., 1996, Influences of cyclones on chlorophyll *a* concentration and *Synechococcus* abundance in a subtropical western Pacific coastal ecosystem, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 140(1/3), 199-205.
- [6] Chekalyuk, A. and Hafez, M., 2011, Photo-physiological variability in phytoplankton chlorophyll fluorescence and assessment of chlorophyll concentration, *Opt. Express*, 19(23), 22643-22658.
- [7] Cho, E.S. and Choi, Y.K., 2005, The characteristics of marine environment and phytoplankton community around southwestern waters for ichthyotoxic dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides* monitoring programme, *JESI.*, 14(2), 177-184.
- [8] Gregor, J. and Maršálek, B., 2004, Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll *a*: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods, *Water Res.*, 38(3), 517-522.
- [9] Humphrey, G.F. and Jeffrey, S.W., 1997, Tests of accuracy of spectrophotometric equations for the simultaneous determination of chlorophylls *a*, *b*, *c1* and *c2*, in: Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C. and Wright, W.S. (Eds.), *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*, UNESCO Publishing, Paris, 616-621.
- [10] Hwang, S.O., Han, M.S. and Kim, B.H., 2006, Evaluation and application of algae online analyzer for alarming algal bloom and water quality management of Korean reservoirs, *Korean J. Limnol.*, 39(2), 257-264.
- [11] Izydorczyk, K., Carpentier, C., Mrówczyński, J., Wagenvoort, A., Jurczak, T. and Tarczyńska, M., 2009, Establishment of an alert level framework for cyanobacteria in drinking water resources by using the algae online analyser for monitoring cyanobacterial chlorophyll *a*, *Water Res.*, 43(4), 989-996.
- [12] Jang, P.G., Jang, M.C., Lee, W.J. and Shin, K.S., 2010, Effects of nutrient property changes on summer phytoplankton community structure of Jangmok Bay, *Ocean Polar Res.*, 32(2), 97-111.
- [13] Jensen, M.Ø. and Moestrup, Ø., 1997, Autecology of the toxic dinoflagellate *Alexandrium ostenfeldii*: life history and growth at different temperatures and salinities, *Eur. J. Phycol.*, 32(1), 9-18.
- [14] Jeong, H.J., Park, J.K., Choi, H.Y., Yang, J.S., Shim, J.H., Shin, Y.K., Yih, W.H., Kim, H.S. and Cho, K.J., 2000, The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea 2. The temporal and spatial variations in the phytoplanktonic community in 1997, *The Sea*, 5(1), 27-36.
- [15] Jephson, T., 2012, Diel vertical migration in marine dinoflagellates, Ph.D. thesis, Dept. of Bio., Lund Univ., Lund, Sweden.
- [16] Joo, H.M., Lee, J.H. and Jung, S.W., 2011, Correlations between cell abundance, bio-volume and chlorophyll *a* concentration of phytoplankton communities in coastal waters of Incheon, Tongyeong and Ulsan of Korea, *Korean J. Environ. Biol.*, 29(4), 312-320.
- [17] Jung, S.W., Joo, H.M., Park, J.S. and Lee, J.H., 2010, Development of a rapid and effective method for preparing delicate dinoflagellates for scanning electron microscopy, *J. Appl. Phycol.*, 22(3), 313-317.
- [18] Jung, S.W., Kwon, O.Y., Joo, H.M. and Lee, J.H., 2007, Variations of phytoplankton standing crops affecting by environmental factors in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007, *Korean J. Environ. Biol.*, 25(4), 303-312.
- [19] Jung, S.W., Kwon, O.Y. and Lee, J.H., 2008, Variation and relationship between standing crops and biomass of phytoplankton dominant species in the marine ranching ground of Tongyeong coastal waters from 2000 to 2007, *Algae*, 23(1), 53-61.
- [20] Jung, S.W., Lim, D.I., Shin, H.H., Jeong, D.H. and Roh, Y.H., 2011, Relationship between physico-chemical factors and chlorophyll-*a* concentration in surface water of Masan Bay: Bi-daily monitoring data, *Korean J. Environ. Biol.*, 29(2), 98-106.
- [21] Kim, H.Y., Kang, D.H. and Jung, S.W., 2017, Development and application of an acoustic system for harmful algal blooms (HABs, red tide) detection using an ultrasonic digital sensor, *Ocean Sci. J.*, online published, doi: 10.1007/s12601-017-0061-0.
- [22] Kim, Y.S., Jeong, C.S., Seong, G.T., Han, I.S. and Lee, Y.S., 2010, Diurnal vertical migration of *Cochlodinium polykrikoides* during the red tide in Korean coastal sea waters, *J. Environ. Biol.*, 31(5), 687-693.
- [23] Lee, Y.S., 2006, Factors affecting outbreaks of high-density *Cochlodinium polykrikoides* red tides in the coastal seawaters around Yeosu and Tongyeong, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 52(10), 1249-1259.
- [24] Nagai, S., Matsuyama, Y., Oh, S.J. and Itakura, S., 2004, Effect of nutrients and temperature on encystment of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* (Dinophyceae), *Plankton Biol. Ecol.*, 51(2), 103-109.
- [25] Navarro, J.M., Munoz, M.G. and Contreras, A.M., 2006, Temperature as a factor regulating growth and toxin content in the dinoflagellate *Alexandrium catenella*, *Harmful Algae*, 5(6), 762-769.
- [26] Park, J.G., Jeong, M.K., Lee, J.A., Cho, K.J. and Kwon, O.S., 2001, Diurnal vertical migration of a harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae), during a red tide in coastal waters of Namhae Island, Korea, *Phycologia*, 40(3), 292-297.
- [27] Park, J.H., Lee, K.J., Cho, J.W., Jeon, S.L. and Kang, S.H., 2015, A study on comparison and analysis of chlorophyll sensor with acetone extraction for chlorophyll measurement in the Nakdong River, *J. KSWW*, 29(3), 325-335.
- [28] Park, T.G., Kim, J.J., Kim, W.J. and Won, K.M., 2016, Development of real-time RT-PCR for detecting viable *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) cysts in sediment, *Harmful algae*, 60, 36-44.
- [29] Raji, K., Muthuraj, A.K. and Padmavati, G., 2014, Silicate as the probable causative agent for the periodic blooms in the coastal waters of south Andaman sea, *App. Env. Res.*, 36(2), 37-45.
- [30] Raymont, J.E., 1980, *Plankton and productivity in the oceans*, vol. 1, second ed., Oxford, Pergamon.
- [31] Shumway, S.E., 1990, A review of the effects of algal blooms

- on shellfish and aquaculture, J. World Aquac. Soc., 21(2), 65-104.
- [32] Taberlet, P., Coissac, E., Pompanon, F., Brochmann, C. and Willerslev, E., 2012, Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding, Mol. Ecol., 21(8), 2045-2050.
- [33] Wagey, G.A., Taylor, F.J.R. and Harrison, P.J., 2001, Bloom of the dinoflagellate *Alexandrium affine* (Inoue and Fukuyo) Balech, in tropical Ambon Bay, Indonesia, in: Hallegraeff, G.M., Blackburn, S.I., Bolch, C.J. and Lewis, R.J. (Eds.), Harmful algal blooms 2000. IOC-UNESCO, Paris, 120-123.
- [34] Wetz, M.S. and Paerl, H.W., 2008, Estuarine phytoplankton responses to hurricanes and tropical storms with different characteristics (trajectory, rainfall, winds), Estuar. Coast, 31(2), 419-429.
- [35] Yang, J.S, Choi, H.Y., Jeong, H.J., Jeong, J.Y. and Park, J.K., 2000, The outbreak of red tides in the coastal waters off Kohung, Chonnam, Korea: 1. Physical and chemical characteristics in 1997, The Sea, 5(1), 16-26.
- [36] Zingone, A. and Wyatt, T., 2005, Harmful algal blooms: keys to the understanding of phytoplankton ecology, in: Robinson, A.R. and Brink, K.H. (Eds.), The Sea, vol. 13, Harvard University Press, Harvard, 867-926.

Received 19 March 2018

Revised 27 April 2018

Accepted 10 May 2018